(مقالهٔ پژوهشی)

# یک مدل جدید ریاضی برای جریان در خط لوله گاز تراکم پذیر همراه با نشت*

مرجان علی‌یاری[۱]　　فائزه فرهادی[۲]

**چکیده** در این مقاله، یک مدل خط لوله گاز همراه با نشت ارائه می‌شود. این مدل نیازی به ارزیابی ویژگی‌های تجهیزات پایین‌دستی نـدارد و به روش‌های عددی پیچیده تکیه نمی‌کند. تغییرات متغیرهای جریان را می‌توان با دقّت مدل پیش‌بینی کرد. در این مدل، یک رویکـرد جدیـد مبتنی بر شباهت بین خط لوله و مدار الکتریکی پیشنهاد می‌شود، به‌طوری‌که، یک مدار معادل با یک ساختار خاص برای شبیه‌سازی خـط لولـه نشت استفاده می‌شود. این رویکرد نوین را می‌توان برای ارزیابی تلفات ناشی از نشت و راهنمـای عملکـرد خـط لولـه و همچنـین کمـک بـه تشخیص نشت ارائه کرد. می‌دانیم که عبارات ریاضی متعدّدی در توصیف جریان در خط لوله با نشت فرموله شده است اما حل آنها به‌سـادگی امکان‌پذیر نیست. این در حالی است که مدل ریاضی خط لوله با نشت را نیز می‌توان با این روش توسعه داد. این مدل با اسـتفاده از داده‌هـای حاصل از یک خط لوله گاز واقعی تأیید می‌شود. نتایج شبیه‌سازی به‌خوبی با نتایج تجربی تطابق دارد که این بر صحت مدل و اعتبار و کارایی روش پیشنهادی صحه می‌گذارد.

**واژه‌های کلیدی** خط لوله؛ مدل‌سازی ریاضی؛ الگویی هیدرولیکی الکتریکی؛ شبیه‌سازی؛ نشت؛ مدار معادل.

## A New Mathematical Model Gas Flows in Pipeline with Leak

M. Aliyari　　F. Farhadi

**Abstract** *In this paper, a gas pipeline model with leakage is presented. This model does not need to evaluate the characteristics of downstream equipment and does not rely on sophisticated numerical methods. Changes in the flow variables can be accurately predicted by the model. In this model, a new similarity-based approach is proposed between the pipeline and the electrical circuit, in which a circuit equivalent to a specific structure is used to simulate the leakage pipeline. This new approach can be used to assess leakage losses and guide pipeline operation as well as to help detect leaks. We know that many mathematical expressions have been formulated to describe the flow in a pipeline by leakage, but it is not easy to solve. However, the mathematical model of a leaky pipeline can also be developed with this method. This model is validated using data from a real gas pipeline. The simulation results are in good agreement with the experimental results which confirm the validity of the model and the validity and efficiency of the proposed method.*

**Key Words** Pipeline; Mathematical Modeling; Hydraulic–Electric Analogy; Simulation; Leakage; Equivalent Circuit.

*تاریخ دریافت مقاله ۹۸/۱/۲۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۸/۷/۳۰ می‌باشد. **DOI:** 10.22067/fum-mech.v31i1.80013

(۱) نویسندهٔ مسئول: استادیار، گروه ریاضی کاربردی، دانشگاه آیت الله بروجردی، ایران. m.aliyari@abryu.ac.ir

(۲) کارشناس ارشد طراح خطوط لوله، شرکت آذرآب ایران، تهران، ایران

## مقدّمه

یکی از مباحث مهم و قابل‌توجّه در صنعت گاز محاسبه گازهای تلف‌شده است و این مسئله همواره به‌عنوان یک معضل مورد توجّه بوده است. عوامل مختلفی در اتلاف گاز نقش دارند که در بسیاری از موارد قابل‌اندازه‌گیری نیستند و باید روش‌هایی برای تخمین و محاسبه آنها پیش‌بینی نمود. برای مثال گازهای خروجی حاصل از نشتِ حاصل از تَرَک و یا نشت در اثر سوراخ شدن خطوط لوله بهنگام برخورد با یک وسیلهٔ مکانیکی و غیره. این نشتی‌ها از کارهای عملیاتی عادی، امور تأسیساتی و توزیع‌کننده‌های سیستم و غیره نتیجه می‌شوند. نشت گاز طبق تعریف عبارت است از خروج ناخواسته گاز که به علل گوناگون و معمولاً به‌طور ناگهانی روی می‌دهد و همواره امکان بروز پدیده نشت گاز در تأسیسات خط لوله، شبکه‌های گازرسانی و منازل وجود دارد.

نشت گاز به علل مختلف در لوله‌های گاز و تأسیسات گازی روی می‌دهد که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از:

۱- خوردگی (corrosion)، در اثر نقص در عایق‌کاری و یا عدم اجرای صحیح حفاظت کاتریک سطوح خارجی لوله‌ها، امکان بروز خوردگی وجود دارد. اگرچه خوردگی‌های عمده در سطوح خارجی لوله‌ها اتفاق می‌افتد ولی امکان بروز خوردگی داخلی چه در لوله‌ها و چه در ظروف عملیاتی به علّت وجود ترکیبات خورنده‌ای مثل هیدروژن سولفوره و آب نیز وجود دارد؛

۲- سایش داخلی (Erosion)، در اثر وجود ناخالصی‌های همراه با گاز پدیدهٔ سایش اتفاق می‌افتد. معمولاً در محل خم لوله‌ها و یا در شیرهای کاهش‌دهنده فشار به علّت افزایش سرعت گاز میزان سایش بیشتر است؛

۳- عوامل خارجی، مانند ضربه‌های مکانیکی و اعمال تنش‌های اضافی؛

٤- نقص در ساختار متالوژیکی لوله‌ها، اتصالات و شیرها و غیره؛

۵- نقص در اجزاء و نصب شیرها و سایر اتصالات فلنجی و رزوه‌ای؛

٦- نقص در جوش لوله‌ها و اتصالات جوشی و....

انجام فرصت‌های مؤثر موجود برای کاهش نشتی در صنعت نفت و گاز می‌توانند به کاهش گم شدن محصول، نشت کمتر متان و منافع بیشتر منجر شود.

مدل‌سازی ریاضی جریان در یک گاز با نشت می‌تواند با در نظر گرفتن تغییرات متغیرهای جریان مانند فشار و سرعت جریان در مجراهای یک خط لوله پس از وقوع یک نشت در نظر گرفته شود، لذا می‌توان از آن برای ارزیابی تلفات ناشی از نشت استفاده کرد. علاوه بر این، مدل‌های ریاضی می‌توانند با استفاده از داده‌های خود مکان وقوع نشت را تشخیص دهد [1-3]. اکثر این مدل‌ها توسط شبیه‌سازی‌های خط لوله مورد تأیید قرار گرفته‌اند، اما دقّت شبیه‌سازی‌های خط لوله توسط موارد واقعی تأیید نشده است.

معادلات حاکم بر رفتار جریان در یک خط لوله، مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل جزئی است و حل آنها به روش‌های تحلیلی و حتی عددی مانند روش مشخصه‌ها (MOC) و انواع مختلفی از روش‌های اختلاف محدود، صریح و ضمنی نیز دشوار است. در همه این روش‌های عددی، نیازمند اطّلاعاتی از شرایط مرزی خط لوله که وابسته به ویژگی‌های بالادست و پایین‌دست دارد، هستیم. ازاین‌رو، مدل خط لوله نشت کمتر از حد معمول است و این نسبت در هنگامی‌که خط لوله دارای پیچیدگی خاصی باشد، افزایش می‌یابد. اوک و همکاران [4] شبیه‌سازی جریان ناشی از شکستن خط لوله و پس‌ازآن قرار دادن یک دریچهٔ اضطراری را بیان و مورد بررسی قرار دادند.

شـین و همکـاران [5] از امـواج صـوتی بـرای تشـخیص ضـربه در خطـوط لولـه اسـتفاده کردنـد. حس‌گرهای پیزوالکتریک (بار الکتریکی‌ای است که در مواد جامد مشخصی به علّت فشار مکـانیکی انباشـته می‌شود) به‌طور گسـترده‌ای بـرای نظـارت بـر سـلامت ساختاری خطوط لوله استفاده می‌شوند.

نوری بروجردی [6] مدل‌سازی جریان گاز گذرا از خطوط لوله به دنبال خرابی فاجعـه‌بـار را موردبررسـی قرار داد که در آن به استفاده از روش اختلاف محـدود از مرتبه ضمنی برای شرایط همرفت جهت اسـتفاده در مدل جریان گاز بی دررو گذرا در صورت پارگی خـط لوله می‌پـردازد و هـدف خـود را کـاهش محاسـبات و زمان انجام عملیات محاسباتی اعلام کرد و نتیجه‌گیـری کردند که در اوایـل زمـان پـس از پـارگی، افـت فشـار قابل‌توجّهی در نقطهٔ شکسـت رخ مـی‌دهـد و در ایـن مرحله جریان متزلزل وجود دارد. در بخش فشـار کـم، حداکثر نقطهٔ فشار وجـود دارد و وارونگـی جریـان در پشت جبهه موج انبساط رخ می‌دهـد. در بخـش فشـار بالا، تغذیه گاز ادامه می‌یابد و با همان مقدار اوّلیّه ثابت نگه‌داشته می‌شـود و سـرعت جریـان بـه یـک جریـان خفه‌شده حالت پایدار می‌رسد. ابوالفضـلی اصـفهانی و همکاران [7] نیز مدلی برای بررسی جریان تراکم پـذیر گذرا به همراه نشتی در خط لوله گاز بـه‌صـورت بـدون بُعد ارائه دادند. در ایـن مـدل، بـا بررسـی پارامترهـای میزان انتشار گاز بدون بُعد از پارگی خط لوله، یک تابع تخلیه جرم منحصربه‌فـرد ارائـه گردیـد. در ایـن مـدل معادلات حاکم بر ابعاد با روش صریح مککورمک برای طیف گسترده‌ای از هندسه متفـاوت لولـه‌هـا و شـرایط مرزی حاکم بر آنها حل‌وفصل شد. نتایج به‌دسـت‌آمـده در این کار نشان‌دهندهٔ آن بود که میزان رهاسازی مـدل سوراخ مستقل از فشار و اصطکاک است، بنابراین تنهـا پارامتر مؤثر قطر نسبی سـوراخ اسـت، درحـالی‌کـه در مدل پارگی کامل میزان رهاسازی تابعی از اصـطکاک و قطر رهاسازی است. با توجّه به دقّت کم در مـدل‌هـای رگرسیون چندگانه کلاسیک، یک مدل اتصـالی منحنـی یک مرحله‌ای یک طرفه در مدل پارگی کامل بـرای بـه دست آوردن همبستگی‌های دقیق استفاده شد. همچنین در این مدل با معرفی یـک شـاخص و معیـار آن بـرای خطوط لوله طولانی می‌توان دریافت کـه ایـن شـاخص نه‌تنها به هندسه وابسته است (نسبت طول به قطر لوله) بلکه به رژیم جریان نیز تعلق دارد (ضریب اصـطکاک). به همین ترتیب در سال‌های اخیـر، برخـی از محققـین سرعت انتشار گاز از یک خـط لولـه، محاسـبه فشـار و سرعت آزاد شدن در نقطهٔ نشت را پیش‌بینی کـرده‌انـد [1,3,8-10]؛ اما در اکثریت آنها فرض بر ایـن بـود کـه شار جرم ورودی برابر با جرم شار آزادشده اسـت، لـذا خطای محاسباتی قابل‌توجّهی در عمل حاصـل گردیـد. فعّالیّـت معمـول بـرای تخمـین نشـتی‌هـای گـاز در شبکه‌های توزیع استفاده از فاکتورهای نشـر اسـت کـه حجم گاز را به ازای واحد طول یا به ازای فشار گاز در خط بیان می‌کند. این فاکتورها بـرای مـواد و فشـارهای مختلف، متفاوت است و انتخـاب مناسـب‌تـرین روش برای یک موقعیت خاص کم‌اهمّیّـت نیسـت و بـه‌طـور ایده‌آل باید بر اساس اطّلاعات پایه‌ای باشد.

در این مقاله، خط لوله با نشت توسـط یـک مـدار الکتریکی معادل شبیه‌سازی‌شده و انتهای خروجی خط لوله می‌تواند با تقریبی از یک نوع مدار در نظـر گرفتـه شود. ایده اصلی این کار برگرفته از مقالات و تحقیقات ابوالقاسـم ذبـیح ا... و همکـاران در [11] و مرتضـی طاهری نـژاد و همکـاران در [12] اسـت. در ادامـه بـه جزییات ایـن روش پرداختـه و مـدل پیشـنهادی را بـا داده‌هـای واقعـی در معـرض آزمـایش و مقایسـه قـرار می‌دهیم.

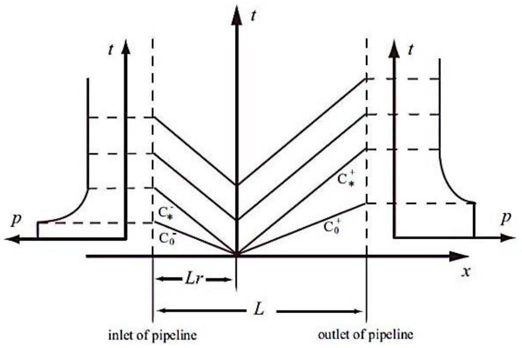
## مدل‌سازی جریان در خط لوله گاز با نشت

برای ساده‌سازی عبارات ریاضی، دو فرضیه زیر در نظر گرفته می‌شود:

الف) جریانِ هم‌دمایی در یک خط لوله فرض می‌شود و بنابراین معادلهٔ انرژی را می‌توان نادیده گرفت.

ب) با توجّه به آنکه مسیر لوله‌های مد نظر بسیارطولانی است، به‌طور مثال خط لوله گاز آغاجاری از جنوب به شمال، طول لوله نسب به شعاع سطح مقطع آن آن‌قدر زیاد است که می‌توان جریان در این نوع خط لوله را یک‌بعدی در نظر گرفت.

با فرض وجود نشت ناگهانی، تغییرات سریع در فشار و سرعت جریان، موجب انتشار امواج از نقطهٔ نشت به دو انتها خط لوله می‌شود [13]. امواج گسترش‌یافته که به‌عنوان موج فشار منفی (NPW) نامیده می‌شوند و انتشار آنها، در شکل (۱) نشان داده شده است.




شکل «۱»: تولید و پخش یک موج گسترده از نقطهٔ نشت.

$L_r$ در شکل (۱)، فاصله از نقطهٔ نشت به مجرای ورودی خط لوله را نشان می‌دهد، درحالی‌که $L$ طول کل لوله است $C^-, C^+$ به ترتیب خطوط مثبت و منفی ماخ هستند. $C_*, C_0$ به ترتیب خطوط ماخ در حالت پایدار قبل و بعد از وقوع نشت هستند. هنگامی‌که NPW به انتهای خط لوله می‌رسد، شرایط مرزی تحت تأثیر قرار می‌گیرد و یک فرآیند تداخلی تسریع می‌شود. مدت‌زمان این گذر تیز خیلی کوتاه است که می‌تواند تنها با فرکانس بسیار بالا نمونه‌برداری شود، به‌عنوان‌مثال ۱۰۰ هرتز.

سیستم نظارت کنترل و اکتساب داده‌ها (SCADA) اغلب برای نظارت بر سیستم خط لوله و اکثر روش‌های تشخیص نشت استفاده می‌شود. بااین‌حال، زمان نمونه‌برداری یک سیستم SCADA از چند ثانیه تا چند دقیقه است؛ بنابراین در این مقاله مطالعه خود را به فرآیند گذرا ملایم محدود کردیم که می‌تواند با معادلات حالت پایدار توصیف شود.

با توجّه به مفروضات فوق و نادیده گرفتن تغییرات ارتفاع در طول خط لوله گاز، معادلات پیوستگی و ممنتم حاکم بر جریان گاز ایده‌آل و هم‌دما در یک خط لوله می‌توانند با توجّه به [14] به‌صورت زیر نوشته شوند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho A) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A) = 0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} = -\frac{\lambda \rho u^2}{2D} \qquad (۲)$$

جایی‌که $\rho$، $u$ و $P$ به ترتیب، چگالی، سرعت و فشار گاز به‌عنوان تابع زمان، $t$ و فاصله $x$ است، $\mu$ نشان‌دهندهٔ ضریب اصطکاک، $D$ نشان‌دهندهٔ قطر لوله و $A$ نشان‌دهندهٔ مقطع عرضی است.

با استفاده از روش مشخصّه‌ها $(MOC)$ در [15] و فرض بر اینکه سطح مقطع عرضی در طول خط لوله ثابت باقی می‌ماند، جریان در خط لوله نامحدود می‌تواند به‌صورت زیر به دست می‌آید [15]:

$$\frac{P_Q^2 - P_Z^2}{G^2 RT} - 2\ln\left(\frac{P_Q}{P_Z}\right) = \frac{\bar{\mu} L}{D} \qquad (۳)$$

$\bar{\mu}$ ضریب اصطکاک متوسط در امتداد طول خط جایی‌که $G$ شار جرم در میان خط لوله است و $G = \rho u$، $P_Q$ فشار ورودی، $P_Z$ فشار خروجی، $R$ ثابت گاز جهانی، $T$متوسط دما در طول خط لوله است. در طول $C_*^-$ در شکل (۱)، فرآیند گذرا به‌طور مستقیم به‌وسیله نشت به وجود می‌آید و جریان در آن قسمت از لوله از نقطهٔ نشت به ورودی خط لوله می‌توان

به‌صورت زیر بیان کرد [15]:

$$\frac{P_Q^2-P_L^2}{Gq^2RT}-2\ln\left(\frac{P_Q}{P_L}\right)=\frac{\bar{\mu}Lr}{D} \qquad (٤)$$

جایی‌که $P_L$ فشار در نشتی، $G_q$ شار جرم بالادست از نقطهٔ نشت است. به همین ترتیب، در طول $C_*^+$ داریم [15]:

$$\frac{P_L^2-P_Z^2}{G_Z^2RT}-2\ln\left(\frac{P_L}{P_Z}\right)=\frac{\bar{\mu}(L-Lr)}{D} \qquad (٥)$$

جایی‌که $G_z$ شار جرم پایین‌دست از نقطهٔ نشت است.

فرض کنید $k$ نرخ نشت در نقطهٔ نشت باشد. همان‌طور که فرض کردیم سطح مقطع لوله در طول خط لوله ثابت باقی می‌ماند، با این فرض $k$ می‌تواند به‌صورت زیر در نظر گرفته شود [16]:

$$k=\frac{Gq-G_z}{Gq} \qquad (٦)$$

معادلات (٦-٤) جریان در یک خط لوله گاز با نشت نشان می‌دهد. تغییرات فشار و جریان در انتهای خط لوله ناشی از نشت می‌تواند با حل این معادلات پیش‌بینی شود.

## حل معادلات مدل بر اساس مدار معادل

***توصیف مدل با یک مدار معادل.*** برای مدل کردن خط لوله نشت، میزان نشت، $k$ و محل نشت، $L_r$ باید در ابتدا معلوم شود، و شارها و نرخ جریان‌ها در انتها با استفاده از معادلات (٦-٤) نیز معلوم می‌گردد. بااین‌حال، ٥ متغیر نامعلوم در معادلهٔ (٦-٤) وجود دارد، مانند $P_Q$ و $P_L$ و $P_Z$، $G_q\ or\ u_q$، $G_z\ or\ u_z$، لذا باید فرض کنیم که یکی از آنها شناخته شده است.

در صورت نشت، میزان نشت در نقطهٔ نشت با فشار اولیّه در مجرای ورودی خط لوله همراه است. بنابراین، در محاسبه تغییرات متغیرهای جریان، فشار ورودی ثابت فرض می‌شود. ازآنجایی‌که ٤ متغیر ناشناخته و مجهول وجود دارد، به نظر می‌رسد راه‌حل دقیقی برای معادلات فوق وجود ندارد [17].

یک رویکرد جدید مبتنی بر شباهت بین سیستم خط لوله و مدار الکتریکی برای حل چنین معادلاتی به این منظور پیشنهاد می‌شود.

هدف اصلی برای شبیه‌سازی خط لوله انتقال گاز به‌عنوان مؤثرترین شبکه‌های پویا انتقال و توزیع گاز طبیعی، وضوح و پیش‌بینی سرعت جریان و توزیع فشار در طول لوله است.

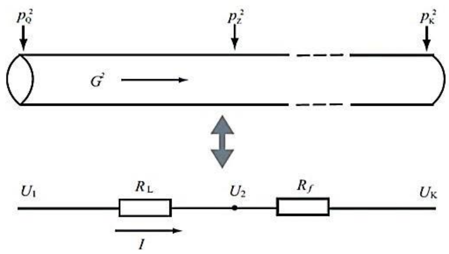
فشار به‌عنوان عامل محرک جریان گاز، در روش قیاس الکتریکی به‌عنوان پتانسیل الکتریکی در نظر گرفته می‌شود که عامل تبدیل برق است. واضح است که جریان گاز نیز با جریان الکتریسیته شباهت دارد. یک عنصر ساده لوله به‌عنوان عنصر الکتریکی است که سرعت جریان و فشار در ابتدا و انتهای آن ذخیره می‌شود. برای ایجاد ارتباط فیزیکی بین اختلاف‌پتانسیل الکتریکی (افت فشار) و جریان الکتریکی از طریق این عنصر (سرعت جریان)، باید مدلی ارائه شود که نشان‌دهندهٔ فیزیک انتقال گاز از طریق خط لوله است [12].

با مطالعات هیدرولیکی / الکتریکی در این زمینه موفق به ارتباط بین فشار و ولتاژ و نیز جریان سیّال به جریان در مدار بین لوله انتقال و مدار الکتریکی شده‌اند، درحالی‌که تنها رابطهٔ مقاومت در برابر حالت پایدار و شیوه برخورد با ویژگی انتهای خروجی خط لوله در نظر گرفته شده است [17].

ازآنجایی‌که مقاومت حالت پایداری دارد لذا فشار ورودی و فشار خروجی تقریباً یکسان‌اند پس در معادلهٔ (٣)، عبارت $2\ln(P_Q/P_Z)$ عددی نزدیک به صفر است بنابراین در مقایسه با دو عبارت دیگر می‌تواند حذف شود. بنابراین معادلهٔ (٣) می‌تواند بازنویسی شود:

$$\frac{P_Q^2 - P_Z^2}{G^2} = \frac{\bar{\mu}LRT}{D} \qquad (۷)$$

طبق معادلهٔ (۷)، اگر با ملاحظه و اغماض به‌صورت تقریبی با توجّه به نزدیک بودن این مقادیر به ۱، لذا می‌توان $P_Q^2$ و $P_Z^2$ را به‌عنوان نیروی حرکت جریان از طریق خط لوله در نظر بگیریم، $G^2$ به جریان و $\bar{\mu}LRT/D$ به‌عنوان مقاومت و ساختار خط لوله شبیه یک مدار الکتریکی می‌شود. با توجّه به ولتاژ مرجع، خط لوله صدمه ندیده و مدار معادل آن در شکل (۲) نشان داده شده است.



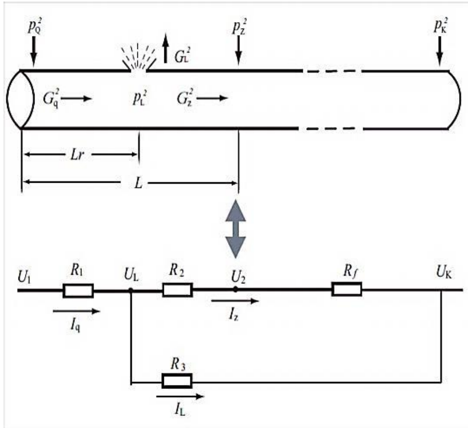
شکل «۲»: خط لولهٔ نامحدود و مدار معادل آن.

در شکل (۲)، $P_K$ فشار مرجع، و $U_K = P_K^2$ ولتاژ متناظر با آن است. $R_L$ متناظر با مقاومت، $\bar{\mu}LRT/D$ است. $R_f$ نشان‌دهندهٔ مقاومت در انتهای پایین‌دست از خط لوله است و می‌تواند به‌صورت زیر محاسبه شود:

$$R_f = \frac{P_Z^2 - P_K^2}{G^2} \qquad (۸)$$

جایی‌که $G, P_Z, P_K$، متغیرهای جریان قبل از وقوع نشت است.

آزاد شدن گاز از خط لوله می‌تواند به‌عنوان شاخه‌ای از خط اصلی در نظر گرفته شود و $R_L$ را به دو بخش تقسیم می‌کند. تخلیهٔ گاز می‌تواند به‌عنوان جریان گاز از طریق مقاومت پنوماتیک به جَو محسوب شود. شکل (۳) خط لوله نشت گاز و مدار معادل آن را نشان می‌دهد. در شکل (۳) با توجّه به معادلات (۶-۴)، $R_1 = \bar{\mu}L_rRT/D$ مقاومت پنوماتیک (پنوماتیک یا نیوماتیک) (نوعی فنّاوری است که به مطالعه و به‌کارگیری گازهای فشرده برای ایجاد نیروی مکانیکی می‌پردازد.) لوله بین ورودی و نقطهٔ نشت است [18].



شکل «۳»: خط لولهٔ نشت و مدار معادل آن.

$R_2 = \bar{\mu}(L - L_r)RT/D$X مقاومت پنوماتیک لوله بین نقطهٔ نشت و انتهای خروجی است، به‌طوری‌که در رابطهٔ $R_L = R_1 + R_2$ صدق می‌کند. $R_3$ مقاومت پنوماتیک معادل است که از طریق آن گاز به جَو جریان می‌یابد. $I_q$ متناظر با $G_q^2$ و $I_z$ متناظر با $G_Z^2$ است. $G_L$ جریان شار آزاد و $I_L$ متناظر با $G_L^2$ و $U_L$ متناظر است با $P_L^2$. با توجّه به معادلهٔ (۶) و روابط بین $I_q$ و $I_z$ داریم:

$$I_z = I_q(1-k)^2 \qquad (۹)$$

***راه‌حل مبتنی بر مدار معادل.*** مدار معادل ارائه شده در بالا نه‌تنها در روابط معادلات (۶-۴) صدق می‌کند، بلکه تقریبی برای مجرای خروجی خط لوله ساخته شده است. از نقطه نظر مدار، یک مقاومت و یک ولتاژ مرجع در مدار برای توضیح جریان در انتهای خروجی خط لوله اضافه می‌شود. ولتاژ مرجع نشان‌دهندهٔ اثربخشی لوله بعدی در این قسمت است و می‌تواند در شرایط عملیاتی ثابت نگه‌داشته شود. این می‌تواند از تطبیق رابطهٔ بین تغییر فشار و تغییر شار جرم در انتها در شرایط عملیاتی خاص برگرفته شده باشد. مقاومت $R_f$، نشان‌دهندهٔ روابط پایدار بین فشار و نرخ جریان

در انتهای خروجی خط لوله است که می‌تواند در صورت نشت در نظر گرفته شود، زیرا تغییرات $R_f$ نسبت به تغییر مقاومت کل خط لوله به میزان کوچکی تغییر می‌کند که می‌تواند نادیده گرفته شود. از تجزیه‌وتحلیل مدارهای معادل نشان داده شده در شکل‌های (۳ و ۲)، می‌توانیم عبارات زیر را به دست آوریم [19]:

$$P_Z = \sqrt{\frac{(P_Q^2 - P_K^2)(1-K)^2 R_f}{(\bar{\mu} LrRT/D) + (1-K)^2\left[\bar{\mu}(L-Lr)RT/D + R_f\right]} + P_K^2} \qquad (۱۰)$$

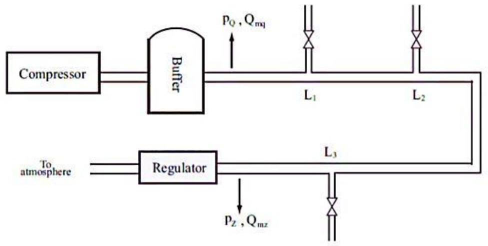
$$G_q = \sqrt{\frac{(P_Q^2 - P_K^2)}{(\bar{\mu} LrRT/D) + (1-K)^2\left[\bar{\mu}(L-Lr)RT/D + R_f\right]}} \qquad (۱۱)$$

$$G_z = \sqrt{\frac{(P_Q^2 - P_K^2)(1-K)^2}{(\bar{\mu} LrRT/D) + (1-K)^2\left[\bar{\mu}(L-Lr)RT/D + R_f\right]}} \qquad (۱۲)$$

با توجّه به نرخ نشت $k$ و محل نشت $L_r$، فشار در انتهای خروجی خط لوله، جریان خروجی و جریان ورودی می‌تواند بر اساس معادلهٔ (۱۲-۱۰) محاسبه شود. این عبارات، ک از تجزیه‌وتحلیل مدار معادل گرفته شده، مدل‌های ریاضی یک نشت گاز را شکل می‌دهند.

## نتایج عددی و مقایسه آن با نمونهٔ تجربی

***معرفی سیستم خط لوله گاز تجربی.*** آزمایش‌های تجربی بر روی یک خط لوله گاز واقعی در یک آزمایشگاه در دانشگاه نفت چین و مشابه آن در یکی از آزمایشگاه‌های شرکت آذرآب در ایران انجام شد. این خط لوله ۲۵۲/٤ متر طول و ۲۵ میلی‌متر قطر بود. سیّال آزمون هوا بود. نشتی که به‌عنوان $L_1$ ، $L_2$ و $L_3$ برچسب‌گذاری شده بود در ۳۸/۵ متر، ۱۱۷ متر و ۲۱۱ متر از ورودی خط لوله قرار داشت. دریچه‌های دستی که در هر نقطهٔ نشتی برای تنظیم اندازه نشت، در هر دو انتهای خط لوله نصب شده است. شکل (٤) نمودار طرح آزمایشی را نشان می‌دهد $P_Q$ و $P_Z$ فشار در دو انتها از خط لوله هستند. $Q_{mq}$ و $Q_{mz}$ اندازه‌گیری سرعت جریان ورودی و خروجی لوله است. در شکل (٤) ملاحظه می‌شود پایان خروجی خط لوله از طریق یک دریچه به اتمسفر باز می‌شود؛ بنابراین، فشار جَو به‌عنوان فشار مرجع در مدل گرفته شده است.



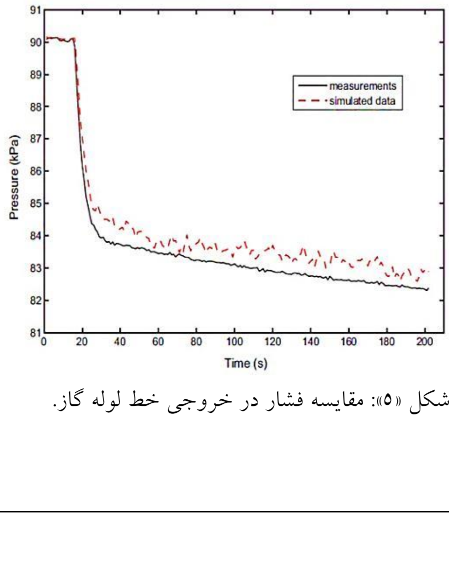

شکل «٤»: نمودار مختصات تست تجربی

***تأیید تجربی مدل خط لوله گاز با نشت.*** با دستکاری سوپاپ‌های دستی در سه نقطهٔ نشت اندازه‌های مختلف نشت اتفاق می‌افتد و تغییرات فشار و جریان در دو انتهای خط لوله ثبت گردید. ضبط فشار خروجی، پایین‌دست و بالادست در ٦۰ ثانیه پس از وقوع نشت با داده‌های واقعی، مقایسه گردید و جدول (۱) نتایج مقایسه را نشان می‌دهد. جدول (۱) نشان می‌دهد که برای همه موارد پیش‌بینی‌های مدل منطبق با اندازه‌گیری‌هاست، به‌ویژه در مورد نشت‌های کوچک، کاملاً منطبق است. خطای محاسبات با افزایش میزان نشت، افزایش می‌یابد و آن به این دلیل است که عبارت $2\ln(P_Q/P_Z)$ در مدل حذف شده است و ضریب اصطکاک با تغییر سرعت تغییر می‌کند. پارامترهای ناشناخته در معادلهٔ (۱۲-۱۰)، $R_f$ و $\bar{\mu}$، از طریق شناسایی بر اساس شرایط استاتیک با توجّه به معادلات به ترتیب (۷ و ۸) برآورد می‌شوند. $\bar{\mu}$ نشان‌دهندهٔ نه‌تنها میانگین ضریب فرسایش در طول خط لوله است، بلکه شامل خطای معرفی شده توسط مفروضات درقسمت " حل معادلات بر اساس مدار معادل می‌شود.

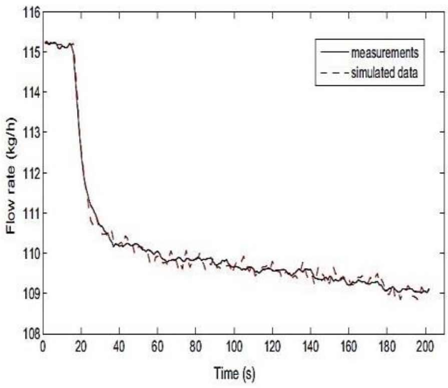
جدول «۱»: مقایسهٔ بین اندازه‌گیری‌ها و مقادیر محاسبه‌شده

| نقطهٔ نشت | میزان نشت (%) | $P_Z$ اندازه‌گیری شده (kPa) | $P_Z$ محاسبه‌شده (kPa) | خطای$P_Z$ (%) | $Q_{mq}$ اندازه‌گیری شده (kg/h) | $Q_{mq}$ محاسبه‌شده (kg/h) | $Q_{mq}$ خطای (%) | $Q_{mz}$ محاسبه‌شده (kg/h) | $Q_{mz}$ اندازه‌گیری شده (kg/h) | $Q_{mz}$ خطای (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $L_1$ (۳۸.۵ متری) | ۱.۴۴ | ۹۴.۵ | ۹۴.۸ | −۰.۳۱ | ۱۲۰.۹ | ۱۲۱ | −۰.۱۲ | ۱۱۹.۱ | ۱۱۹.۰ | ۰.۰۷ |
| | ۶.۸۴ | ۹۲.۷ | ۹۳.۳ | −۰.۵۸ | ۱۲۶.۳ | ۱۲۶.۶ | −۰.۲۵ | ۱۱۷.۱ | ۱۱۸.۰ | −۰.۲۵ |
| | ۱۱.۸ | ۸۹.۹ | ۹۰.۹ | −۱.۱۵ | ۱۳۱.۱ | ۱۳۱.۵ | −۰.۳۷ | ۱۱۵.۶ | ۱۱۶.۰ | −۰.۳۷ |
| | ۲۳.۱ | ۸۱.۷ | ۸۳.۲ | −۲.۶۶ | ۱۴۲.۲ | ۱۴۳.۳ | −۰.۷۲ | ۱۰۹.۴ | ۱۱۰.۲ | −۰.۷۲ |
| $L_2$ (۱۷۱ متری) | ۱.۶۸ | ۹۴.۰ | ۹۳.۹ | ۰.۰۸ | ۱۲۱.۳ | ۱۲۱.۲ | ۰.۰۲ | ۱۱۹.۲۴ | ۱۱۹.۲۲ | ۰.۰۲ |
| | ۸.۱۵ | ۸۳.۱ | ۸۳.۰ | −۰.۰۳ | ۱۱۹.۴ | ۱۱۹.۰ | ۰.۳۷ | ۱۰۹.۶ | ۱۹.۲ | ۰.۳۷ |
| | ۱۴.۰ | ۸۳.۲ | ۸۳.۴ | −۰.۰۴ | ۱۲۹.۴ | ۱۲۸.۳ | ۰.۷۰ | ۱۱۱.۱ | ۱۱.۳ | ۰.۷۰ |
| | ۲۱.۳ | ۷۴.۸ | ۷۵.۱ | −۰.۳۴ | ۱۳۲.۲ | ۱۳۱.۰ | ۰.۹۱ | ۱۰۴.۰ | ۱۰۳.۱ | ۰.۹۲ |
| $L_3$ (۲۱۱ متری) | ۱.۲۷ | ۹۳.۳ | ۹۴.۱ | −۰.۲۱ | ۱۱۹.۸ | ۱۲۰.۰ | −۰.۱۶ | ۱۱۸.۲ | ۱۱۸.۴ | −۰.۱۶ |
| | ۷.۸۹ | ۸۷.۴ | ۸۸.۱ | −۰.۷۳ | ۱۲۲.۷ | ۱۲۲.۸ | −۰.۱۰ | ۱۱۳.۰ | ۱۱۳.۲ | −۰.۱۰ |
| | ۱۱.۸ | ۸۰.۳ | ۸۴.۰ | −۱.۲۰ | ۱۲۴.۵ | ۱۲۴.۵ | −۰.۳۳ | ۱۰۹.۷ | ۱۰۹.۸ | −۰.۰۳ |
| | ۲۲.۶ | ۷۰.۲ | ۷۲.۰ | −۲.۶۵ | ۱۲۸.۸ | ۱۲.۶ | ۰.۱۲ | ۹۹.۷ | ۹۹.۵ | ۰.۱۲ |

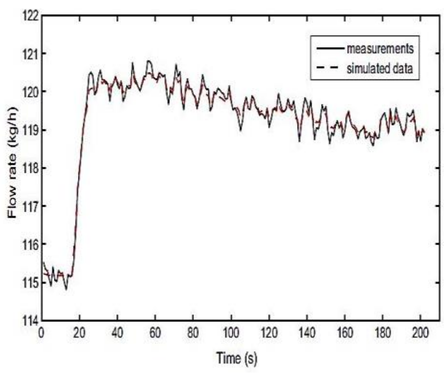
شکل های (۷–۵) مقایسه بین نتـایج شـبیه سـازی و اندازه‌گیری را به‌عنوان یک نشت در $L_2$ نشان می دهد، ه مربوط به موارد ذکر شده در جدول (۱) با میـزان نشـتی ۸.۱۵٪ است. نرخ نشت در جدول (۱) بر اساس معادلهٔ (٦) برآورد شده است. نتایج تجربی به‌دست‌آمده توانایی مدل در شبیه سازی فرآیند انتشار و همچنین توانـایی آن در تولید داده های تست برای بررسی الگوریتم تشخیص نشت را تأیید می‌کند.



شکل «۵»: مقایسه فشار در خروجی خط لوله گاز.



شکل «٦»: مقایسهٔ نرخ جریان خروجی خط لوله گاز.

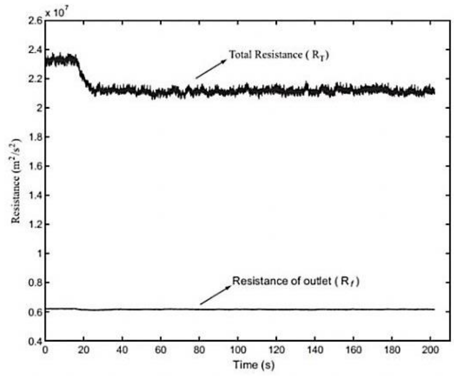


شکل «۷»: مقایسهٔ نرخ جریان ورودی خط لوله گاز.

شکل (۸) تغییرات در مقاومت کل خط لوله و پایان خروجی خط لوله را در هنگام نشت، نشان می‌دهد. در شکل (۸)، $R_f$ ، مقاومت پایان خط لوله، با معادلهٔ (۸) برآورد شده و مقاومت کل خط لوله، $R_T$ به شرح زیر محاسبه می‌شود [19]:

$$R_T = \frac{P_Q^2 - P_0^2}{G_q^2} \tag{۱٤}$$

برای یک خط لوله آزمایشگاهی، $R_T$ تقریباً ثابت است. در صورت نشتی، همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می شود، $R_f$ تغییرات ناچیز در مقایسه با $R_T$ دارد. بناب؛ ین، تغییرات $R_f$ را می‌تواند بدون وقفه در وقوع یک نشت در نظر گرفته شود.



شکل «۸»: تغییر مقاومت یک خط لوله در وقوع یک نشت.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله یک راه ساده و کارآمد برای توسعه مدل‌های خط لوله نشتی ارائه شد. مدل‌های توسعه‌یافته در این روش می‌توانند برای برآورد تغییرات فشار و جریان در مجرای یک خط لوله پس از وقوع نشت استفاده شوند. عبارات ریاضی توصیف جریان در خط لوله با نشت فرموله شده است. برای حل معادلات مدل، یک رویکرد جدید مبتنی بر شباهت بین خط لوله و مدار الکتریکی پیشنهاد شده است. به‌این‌ترتیب، یک مدار معادل با ساختار خاصی برای شبیه‌سازی خط لوله با نشت استفاده شده است و تقریبی خاص برای بیان دیدگاه پایان خط لوله از نقطه نظر مدار ساخته شده است. بر اساس مدار معادل، مدل ریاضی خط لوله با نشت توسعه‌یافته است. مدل‌ها با داده‌های حاصل از یک سیستم خط لوله گاز تجربی با نشت تأیید شد. از شواهد تجربی می‌توان نتیجه گرفت که برای یک محل مشخص نشت و تغییرات میزان نشت و فشار ورودی به زمان، تغییرات فشار خروجی، جریان خروجی و جریان ورودی با دقّت با مدل ریاضی برآورد می‌شود و فرآیند انتشار نیز می‌تواند شبیه‌سازی شود. موفقیت مدل در شبیه سازی خط لوله نشت همچنین اعتبار روش را تأیید می‌کند.

## واژه‌نامه

| | |
|---|---|
| خط لوله | Pipeline |
| نشت | Leakage |
| همدما | Isothermal |
| مدل‌سازی ریاضی | Mathematical modeling |
| مدارمعادل | Equivalent circuit |
| پایین‌دست جریان | Down steam |
| بالادست جریان | Upstream |
| نرخ جریان | Flow rate |
| خوردگی | Corrosion |
| سایش داخلی | Erosion |
| ضریب اصطکاک | Friction coefficient |

## مراجع


1. Benkherouf, A. and Allidina, A.Y., "Leak detection and location in gas pipelines", *IEE, Proceedings, Part D, Control Theory and Applications*, Vol. 135, No. 3, pp. 142–148, June (1988).
2. Billmann, L. and Isermann, R., "Leak detection methods for pipelines", *Automatica*, Vol. 23, No. 1, pp. 381–385, September (1987).
3. Emara-Shabaik, H.E., Khulief, Y.A. and Hussaini, I., "A non-linear multiple-model state estimation scheme for pipeline leak detection and isolation", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I, *Journal of Systems and Control Engineering*, Vol. 216, No. 3, pp. 497–512, June (2002).
4. Oke, A., Mahgerefteh, H., Economou, I. and Rykov, Y., "A transient outflow model for pipeline puncture", *Chemical Engineering Science*, Vol. 58 , No. 2, pp. 4591–4604, February (2003.)
5. Shin, Y.W., Kim M.S. and Lee, S.K., "Identification of to detection of impact source location based on signal processing", *Journal of Mechanical Science and Technology*, pp. 2401-2411, December (2010).
6. Nouri-Borujerdi, A., "Transient modeling of gas flow in pipelines following catastrophic failure", *Math. Comput. Model*, 54, 3037e304, (2011).
7. Abolfazli Esfahani, J. and Moloudi, R. "Modeling of gas release following pipeline rupture: Proposing nondimensional correlation", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 32, 207-21, (2014).
8. Huo, C., Dong, Y., Yu, D., Gao, H., Zhou, J. and Feng, Y., "Estimation of accidental gas release flow rate in long transmission pipelines", *Acta Petrolei Sinica*, Vol. 25, No. 4, pp. 101–105, July (2004).
9. Jo, Y.D. and Ahn, B.J., "A simple model for the release rate of hazardous gas from a hole on high-pressure pipelines", *Journal of Hazardous Material*s, Vol. 97, No. 3, pp. 31–46, May (2003).
10. Wylie, E.B. and Streeter, V.L., "*Fluid Transients in Systems*", Prentice Hall Inc., New Jersey, (1993).
11. Kolbadinejad, M., Zabihollah, A., Khayyat, A.A. and Ollah Mahmoud Pour, M. "An equivalent electrical circuit design for pipeline corrosion monitoring based on piezoelectric elements", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 27, pp. 799-804, March (2013).
12. Taherinejad, M., Hosseinalipour, S.M. and Madoliat, R. "Steady Flow Analysis and Modeling of the Gas Distribution Network using the Electrical Analogy", *International Journal of Engineering (IJE) Transactions B: Applications*, Vol. 27, No. 8, pp. 1269-1276, (2014).
13. Li, W., "One-Dimensional Non-steady Flow and Shock Waves", *National Defense Industry Press, Beijing*, Vol. 15, No. 8, China, (2003).
14. Finnemore, E.J. and Franzini, J.B., "*Fluid Mechanics with Engineering Applications*", $10^{th}$ ed., McGraw-Hill, New York, (2003).
15. Yao, G., "*The Design and Management of Gas Transmission Line*", China University of Petroleum Press, Dongying, China, (1991).
16. Sun, L. and Wang, J., "Modeling and simulation of leaking gas pipeline", *Journal of System Simulation*, Vol. 23, No. 6, pp. 1310–1314, November (2011) .
17. Lin, K. and Holbert, K.E., "Applying the equivalent pi circuit to the modeling of hydraulic pressurized lines", *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 79, pp. 2064–2075, November (2009).
18. Kamiński, Z., "Mathematical Modeling of Pneumatic Pipes in a Simulation of Heterogeneous Engineering Systems", *Journal of Fluids Engineering*, 133(12): 121401 (7 pages), Dec( 2011).
19. Sun, L., "Modeling and simulation of leaking gas pipeline", *Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 82, pp. 2253–2267, June (2012).